

УДК 639.2.081.117

К ТЕОРИИ ЛОВА РЫБЫ ТРАЛИРУЮЩИМИ ОРУДИЯМИ

Н.Н.Андреев

Тралирующие орудия

По классификации, впервые предложенной Ф.И.Барановым (1933), тралирующими называют орудия, которые во время лова буксируют, облавливая таким образом огромные объемы воды при сравнительно небольших размерах невода. Отличительная конструктивная особенность тралирующих орудий — наличие большого глубокого конусообразного сетного мешка и отсутствие крыльев. Захват рыбы орудиями этого типа обеспечивается большими размерами устьевой части сетного конуса и соответствующей скоростью буксировки.

К тралирующим орудиям относятся всевозможные тралы для лова с одного или двух судов. Отнесение к орудиям этого типа донных неводов, на наш взгляд, не совсем верно, поскольку принцип их действия основан на окружении рыбы длинными урезами с последующей концентрацией ее перед устьем мотни невода. У этих неводов урезы выполняют роль крыльев. Поэтому донные невода относятся скорее к обкидным, чем к тралирующим орудиям лова.

По-видимому, прав И.В.Никоноров (1968), который тралирующие орудия делит на горизонтальные и вертикальные, относя к последним подхваты, поддоны и подъемные невода. В частности, по этой классификации к тралирующим орудиям следует отнести и конусные сети, применяемые для лова каспийской кильки на электросвет. Эти орудия безусловно подходят под то определение, которое дал тралирующим орудиям Ф.И.Баранов (1933).

Уловистость тралирующих орудий

Существует два понятия уловистости трала: абсолютная и относительная. Под первой Ф.И.Баранов понимал отношение улова

трала ко всему количеству рыбы, находившейся в протраленном объеме воды. Если сравнить уловистость двух тралов, приняв при этом уловистость одного из них за единицу, получим относительную уловистость второго трала. Легко видеть, что эта величина может быть больше 1, поэтому ее физическая сущность совершенно иная, чем физическая сущность абсолютной уловистости.

В дальнейшем были сделаны многочисленные попытки не только определить величину абсолютной и относительной уловистости трала, но и видоизменить эти понятия с тем, чтобы наилучшим образом характеризовать эффективность работы трала. Подробная библиография по этому вопросу приведена в книге А.Л.Фридмана, М.М.Розенштейна и В.Н.Лукашева (1973).

Сравнительная уловистость трала важна только при оценке преимуществ новых конструкций перед существующими. Для решения теоретических вопросов тралового промысла необходимо пользоваться понятием "абсолютная уловистость", которую в дальнейшем мы будем называть просто уловистостью и обозначать буквой φ .

Так как абсолютная уловистость трала является объективным показателем достоинств той или иной конструкции трала, ее определение имеет не только теоретическое, но и большое практическое значение.

Несмотря на то что уловы современных тралов достигают большой величины, их уловистость, безусловно, заметно меньше единицы, т.е. часть рыбы, находящаяся в зоне облова, в процессе лова уходит от трала. Часть рыб, попав в траловый мешок, в дальнейшем проходит сквозь сетное полотно (отсеивается), а часть уходит из зоны облова, совсем не попадая в трал. Некоторые специалисты даже считают, что абсолютная уловистость тралов при лове таких рыб, как тресковые, имеет малую величину (Дубровский, 1964).

Было сделано много попыток определить уловистость трала экспериментально или путем расчета. Первый метод расчета уловистости трала был предложен Ф.И.Барановым в 1918 г. Тогда же он установил, что уловистость тралов для лова камбалы — выше 0,25, как до этого считал Гейнке (Баранов, 1971). Значительно позднее Ф.И.Баранов (1969) предложил другой, более простой метод оценки уловистости трала.

В дальнейшем определении уловистости трала занимались

многие исследователи. Так, по данным В.Н.Честного (1961), уловистость камбального трала составляет 0,5. Ю.С.Сергеев (1969) нашел, что уловистость 31-метрового трала для лова сельди и хека при скорости буксировки 4 узла равна 0,46, а при 4,5 узла - 0,57. В целом для лова подвижных и малоподвижных рыб, по данным В.А.Ионас (1966), уловистость колеблется от 0,2 до 0,5.

Таким образом, можно считать экспериментально установленным, что при лове тралами некоторая часть рыб, иногда значительная, уходит из зоны облова.

Теоретические исследования уловистости тралов

Несмотря на то что в современном мировом рыболовстве лов тралами является основным и что вопросам проектирования тралов посвящено очень много работ, до сих пор нет единой, всеми признаваемой теории лова рыбы тралами. Между тем невозможно создать теорию уловистости трала, если нет ясного представления о том, как рыба попадает в трал. На первый взгляд кажется, что легче понять, почему дальневосточная треска не ловится тралами, чем объяснить, почему этот сильный хищник попадает в тралы в Баренцевом море.

Первой и, пожалуй, наиболее обстоятельной работой по созданию теории уловистости трала были исследования С.Б.Гюльбадамова (1958). В этих исследованиях подробно рассмотрены все факторы, определяющие конструктивные особенности трала, и на этой основе даны конкретные рекомендации по выбору основных параметров трала. При проектировании тралов должны быть учтены следующие биологические факторы: "... характер распределения рыб; наиболее часто встречающиеся размеры рыб; размеры стай (косяков) рыб; скорость перемещения косяков в воде при обычных условиях и в момент испуга, т.е. "скорость бросков рыбы"; величина "бросков" или же продолжительность этого процесса; зрительная способность объекта лова, т.е. дальность видения рыбы в воде; реакция рыбы на звуковые раздражители и дальность восприятия ею звуков; реакция рыбы на сетное полотно, движущееся в воде с некоторой скоростью; некоторые специфические особенности в поведении рыбы при встрече с препятствиями" (Гюльбадамов, 1958).

По С.Б.Гюльбадамову, площадь устья трала

$$S_y = C_r' + \pi \left[\left(\frac{h_k}{2} + \eta_p \right)^2 - \left(\frac{h_k}{2} \right)^2 \right],$$

или
$$S_y = C_k'' + \pi (h_k b_p + b_p^2);$$

Площадь входного отверстия в кутке трала

$$S_b = \pi (b_p + l^k)^2$$

вертикальное раскрытие трала

$$B_{mp}^o = h_k + 2b_p$$

горизонтальное раскрытие трала

$$A_{mp}^o = B_{mp}^o + 2b_p = h_k + 4b_p;$$

где C_k'' - площадь поперечного сечения косяка вертикальной плоскостью;

h_k - размер косяка по вертикали;

b_p - дальность видения рыбы;

l^k - расстояние объекта лова от осевой линии кутка.

Эта интересная работа С.Б.Гюльбадамова вызвала оживленную дискуссию и привлекла к проблеме теории тралового лова многих специалистов.

А.И.Зонов (1964), а затем Ю.С.Сергеев (1969) сделали попытку использовать теорию лова ловушками, разработанную М.Таути для построения по этой схеме теории тралового лова. Исходя из этого, путем простых рассуждений А.И.Зонов пришел к уравнению

$$q = \frac{a_k S V}{b} (1 - e^{-bt}),$$

где q - количество рыбы, пойманной тралом за время траления;

k - концентрация рыбы в облавливаемом объеме;

S - площадь устья трала;

V - скорость траления;

a - безразмерный коэффициент пропорциональности, показывающий, какая часть рыбы, находящейся перед тралом, попадает в трал, т.е. уловистость трала;

b - коэффициент, показывающий, какая часть рыбы, попавшая в трал, уходит из него за единицу времени.

Коэффициент b , по мнению А.И.Зонова, зависит от подвижности рыбы и скорости траления. Величина коэффициента b определяется скоростью траления, подвижностью рыб, их размером и величиной ячей в трале. По утверждению автора, этот коэффициент имеет размерность $[\frac{1}{t}]$.

Не вдаваясь в обсуждение правомерности использования теории лова ловушками для построения теории тралового лова, а такие сомнения, безусловно, есть, так как принципы лова этими

орудиями и поведение рыб при встрече с ними совершенно различны, хотелось бы только отметить совершенно различный подход к решению задачи у С.Б.Гюльбадамова, с одной стороны, и у А.И.Зонова и Ю.С.Сергеева - с другой. Первый искал такие параметры траловой системы, при которых данный объект будет пойман обязательно; вторые попытались описать процесс накопления рыбы в трале с течением времени траления.

Для построения правильной теории лова тралами необходимо исходить из особенностей поведения рыб при встрече с тралом. К настоящему времени в результате многочисленных подводных наблюдений за ловом рыбы тралом накоплен обширный материал, подтверждающий высказанную Ф.И.Барановым (1971) мысль, о том, что некоторая часть рыб, находящаяся на пути движения трала, уходит, т.е. не попадает в трал.

Наиболее обстоятельные наблюдения за процессом поимки рыбы тралом провели В.К.Коротков и А.С.Кузьмина (1972). По этим наблюдениям, рыба, находящаяся в устье трала, не стремится уйти из зоны облова, а держится на расстоянии нескольких метров от сетного полотна; только попадая в более узкую, предкютковую часть сетного мешка, рыба начинает метаться и искать выход из трала. "Перед входом в траловый мешок, когда периметр поперечного сечения сетного конуса уменьшается примерно до 7-8 м, комплекс оптических и акустических раздражителей и давление за счет уменьшения фильтрации воды ..., очевидно, становятся настолько сильными, что у рыб нарушается равновесие между отдельными анализаторами, стайные контакты теряются, движения становятся беспорядочными, и рыба стремится выйти из трала через ячейку сетного полотна. Если размер ячейки подобран без учета реакции облавливаемой рыбы, то она сильно обмячается" (Коротков, Кузьмина, 1972).

Из этого следует, что при встрече с тралом рыба ведет себя совершенно иначе, чем при встрече с ловушками. Конечно, поведение рыбы, которое наблюдали В.К.Коротков и А.С.Кузьмина, видимо, является частным случаем. Из литературы известно, что одни рыбы при встрече с тралом пытаются уйти через его верхнюю часть, а другие прижимаются ко дну водоема. Однако еще никто не наблюдал, чтобы рыба при встрече с тралом вела себя так же, как при встрече с крылом и входным устройством ловушки.

Совершенно новую и очень интересную идею развил в своих работах В.А.Ионас (1966, 1967). Используя анализ размерностей,

он установил, что уловистость трала можно представить в следующем виде:

$$\varphi = 1 - \frac{r^2 U_p}{S U}$$

где r - расстояние, на котором рыба ощущает трал как опасность;
 U_p - скорость ухода рыбы из зоны облова;
 S - площадь устья трала;
 U - скорость траления.

Путем весьма остроумных рассуждений эту формулу автор преобразовал следующим образом:

$$\varphi = 1 - \frac{U_0}{U}$$

где U_0 - скорость, при которой трал не ловит рыбу.

Используя данные А.В.Лестева по лову сельди и трески в Беринговом море, В.А.Ионас и получил приведенные выше цифры уловистости тралов.

Из всех биологических факторов, которые необходимо учитывать при определении уловистости трала, самым трудным для количественного выражения является r_p - дальность видения рыбы (по терминологии С.Б.Гольбадамова), или r - расстояние, на котором рыба ощущает трал как опасность (по терминологии В.А.Ионаса).

Ю.С.Сергеев правильно замечает, что конкретную реакцию рыбы на движущийся трал (скорость ухода рыбы, скорость броска, дальность видения и т.д.) очень трудно выразить количественно. К тому же не совсем ясно, по каким причинам одни рыбы спокойно заходят в трал (дают себя поймать), а другие уходят из облавливаемого пространства. Например, прямыми наблюдениями установлено, что во многих случаях рыба и видит, и слышит трал, но на него не реагирует. По-видимому, реакция рыбы на попытки поймать ее определяется более "тонкими" факторами (физиологическим состоянием, "настроением", состоянием физических полей и т.д.), чем видимость сети в воде, звуки, которые издает движущийся трал и т.д. Выбирать наугад эти факторы и на основании их учета строить модель лова - малоэффективный путь. Когда не знаешь, что ищешь, легко можно пройти мимо того, что надо искать.

С другой стороны, правильная теория лова (и не только тралами) может быть построена только путем учета всех конкретных факторов поведения рыб. На первый взгляд, возникает тупик, так как изучением конкретных факторов поведения рыб никто до сих пор не занимался и не занимается. Но на самом

деле из этого тупика есть выход. Теорию тралового лова можно построить, вводя в расчет обобщенные биологические характеристики поведения рыб, которые учитывают все возможные виды внешних воздействий на рецепторы рыбы и ее реакцию на эти раздражители. По такому принципу в свое время была построена теория лова рыбы кошельковыми неводами, которая вполне удовлетворительно объясняет многие закономерности, наблюдающиеся на практике.

Теория лова тралом, имеющим круговое устье

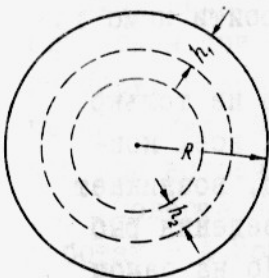
При построении теории лова тралом будем исходить из того, что в процессе лова часть рыбы уходит из облавливаемого пространства, при этом интенсивность ухода определяется биологическими особенностями объекта лова и внешними условиями и она тем больше, чем ближе к сетной поверхности трала находится рыба.

Пусть устье трала имеет в сечении, перпендикулярном к линии движения, форму круга, описанного радиусом R (рис. 1). Пусть, далее, вся рыба, находящаяся на площади кругового кольца, имеющего ширину h_1 , и примыкающего к подборам, уходит из трала. Кроме того, предположим, что часть рыб, находящихся в плоскости следующего кольца, имеющего ширину h_2 , уходит из трала лишь частично. Для расчета положим, что интенсивность ухода с площади этого кольца уменьшается по линейному закону от внешней части, становясь равной нулю на внутренней границе кольца. Вся рыба, находящаяся внутри круга, образованного этим кольцом, попадает в трал.

Если рыба распределена по всему объему воды равномерно с плотностью n шт./м³, при перемещении трала на l м будет поймано с площади внутреннего круга

$$q_1 = \pi n (R - h_0)^2$$

где q_1 - число пойманных рыб, $h_0 = h_1 + h_2$.



Количество рыб, которое будет поймано с внутреннего кольца, можно вычислить следующим путем. На расстоянии r от центра круга вырежем кольцо бесконечно малой толщины.

Рис. 1. Расчетная схема к теории лова тралами, имеющими круговое устье

Площадь этого кольца будет равна $dS = 2\pi r dr$, где dr - толщина (по радиусу) кольца. Предположим теперь, что, начиная с расстояния $R - h_0$ от центра, часть рыб уходит из облавливаемого пространства, при этом интенсивность ухода прямо пропорциональна расстоянию от центра круга, т.е. на расстоянии $R - h_0$ интенсивность ухода равна 0, а на расстоянии $R - h_1$ она равна n .

Тогда плотность пойманной рыбы n_i на расстоянии r от центра круга $[(R - h_0) < r < (R - h_1)]$ будет равна

$$n_i = n \left[1 - \frac{r - (R - h_0)}{h_2} \right] = \frac{n}{h_2} (R - h_1 - r).$$

Улов с площади элементарного кольца равен

$$dq = n_i dS = 2\pi n \frac{R - h_1 - r}{h_2} r dr = \frac{2\pi n}{h_2} [(R - h_1)r - r^2] dr.$$

Интегрируя это уравнение в пределах от $R - h_0$ до $R - h_1$ получим

$$q_2 = \frac{2\pi n}{h_2} \int_{R-h_0}^{R-h_1} [(R - h_1)r - r^2] dr = \frac{2\pi n}{h_2} \left[\frac{1}{2} (R - h_1)r^2 - \frac{r^3}{3} \right]_{R-h_0}^{R-h_1}$$

Подставляя пределы интегрирования и преобразовывая, получим

$$q_2 = \frac{2\pi n}{h_2} \left\{ \frac{1}{6} (R - h_1)^3 - (R - h_0)^2 \left[\frac{1}{2} (R - h_1) - \frac{1}{3} (R - h_0) \right] \right\}.$$

Общий улов Q равен $q_1 + q_2$ т.е.

$$Q = \pi n \left\{ (R - h_0)^2 + \frac{2}{h_2} \left[\frac{1}{6} (R - h_1)^3 - (R - h_0)^2 \left[\frac{1}{2} (R - h_1) - \frac{1}{3} (R - h_0) \right] \right] \right\}$$

Преобразовывая и упрощая, находим

$$Q = \frac{\pi n}{3h_2} \left[(R - h_1)^3 - (R - h_0)^3 \right] \quad (I)$$

В этой формуле неизвестны три величины, зависящие от биологических особенностей объекта лова и внешних условий (состояние физических полей, температура воды, прозрачность, конструкция траловой системы и т.д.). Эти параметры могут быть легко определены экспериментальным путем, если иметь в виду, что при лове однотипными тралами (различающимися лишь площадью входного устья) величины h_1 и h_2 (следовательно и h_0) зависят главным образом от поведения объекта лова. Поэтому при одновременном лове тремя тралами разных размеров получим три уравнения с тремя неизвестными величинами n, h_1 и h_2 , которые не зависят от размеров трала.

Уловистость трала

$$\psi = \frac{Q}{\pi R^2 n} = \frac{1}{3h_2 R^2} \left[(R-h_1)^3 - (R-h_0)^3 \right] \quad (2)$$

может быть определена делением улова на площадь устья трала, так как рассматривается перемещение трала на 1 м.

Простой анализ показывает, что $\psi = 1$, когда $R = \infty$

В самом деле, уравнение (1) можно представить в следующем виде:

$$Q = \pi n \left[R^2 - R(h_1 + h_0) + \frac{1}{3h_2} (h_0^3 - h_1^3) \right].$$

Следовательно,

$$\psi = 1 - \frac{h_1 + h_0}{R} + \frac{h_0^3 - h_1^3}{3h_2 R^2} \quad (2')$$

При увеличении R два последних члена этого уравнения убывают, так как h_1 и h_2 , а следовательно, h_0 остаются постоянными.

При уменьшении величины R уменьшается площадь центральной зоны, в пределах которой рыба, находящаяся там, полностью улавливается тралом. Когда $R \leq (h_1 + h_2)$ эта зона исчезает, и со всех точек облавливаемого пространства часть рыбы уходит. В случае, когда $R = h_1 + h_2 = h_0$ улов равен

$$Q = \frac{\pi n}{3h_2} (R-h_1)^3 \quad (1')$$

С другой стороны, $\psi = 0$, когда $h_1 = R$ а $h_2 = 0$.

Так как вся рыба не может уходить из процеживаемого объема (мы не рассматриваем случай, когда $Q = 0$), при дальнейших расчетах всегда надо считать, что $h_2 > 0$. С другой стороны, возможен случай, когда поведение рыбы и параметры рыболовной системы таковы (поведение объекта лова, размеры орудия, скорость буксировки и т.д.), что $R < h_0$ и даже $R < h_2$. В этом случае улов можно определить следующим путем.

Положим, что $h_2 > R$. Тогда плотность пойманных рыб в центре устьевого круга будет меньше, чем n , т.е. $n_0 < n$. Определим n_0 , предположив, что

$$\frac{n}{h_2} = \frac{n_0}{R-h_1},$$

т.е. что рыба уходит с такой интенсивностью, при которой количество пойманных рыб (плотность пойманных рыб) в центре

круга меньше, чем n , и убывает по линейному закону в зависимости от расстояния от центра круга.

Плотность пойманных рыб в центре круга равна

$$n_0 = n \frac{R-h_1}{h_2}.$$

Если теперь повторить предыдущие расчеты, считая, что плотность улавливаемых рыб в центре круга равна n_0 , то

$$\frac{n_0}{R-h_1} = \frac{n_i}{R-h_1-r},$$

или
$$n_i = \frac{n}{h_2} (R-h_1-r),$$

т.е. выражение для n_i имеет тот же вид, что и в первом случае.

Улов с элементарного кольца, отстоящего на расстояние r от центра круга, будет равен

$$dq = \frac{2\pi n}{h_2} (R-h_1-r) r dr.$$

Общий улов получим, интегрируя это выражение от 0 до $R-h_1$, так как при $r=0$ $n_i = \frac{n}{h_2} (R-h_1) = n_0$.

Имеем
$$Q = \frac{2\pi n}{h_2} \int_0^{R-h_1} (R-h_1-r) r dr = \frac{2\pi n}{h_2} \left[(R-h_1) \frac{1}{2} (R-h_1)^2 - \frac{1}{3} (R-h_1)^3 \right],$$

или
$$Q = \frac{\pi n}{3h_2} (R-h_1)^3.$$

(3)

Таким образом, в случае, когда $R < h_0$, зависимость улова от параметров рыболовной системы имеет тот же вид, что и в случае, когда $R = h_0$.

Вычисления показывают, что величина Q , определяемая по формуле (1), совпадает с величиной Q , определяемой по формуле (3), только при $R = h_0$. Во всех других случаях эти формулы дают различные результаты. С этим необходимо считаться при определении уловистости трала.

Решение уравнения (1) громоздко. Его можно упростить:

$$Q = \pi n \left[R^2 - R(2h_1 + h_2) + h_1^2 + h_1 h_2 + \frac{1}{3} h_2^2 \right].$$

Если $h_1 = 0$, то

$$Q = \pi n (R^2 - h_2 R + \frac{1}{3} h_2^2). \quad (I'')$$

Если при этом $h_2 > R$, из формулы (3) получим

$$Q = \frac{\pi n R^3}{3 h_2}. \quad (I''')$$

Наличие зависимостей (I''), (I''') и (3) может существенно упростить анализ экспериментальных данных. Обработку опытного материала следует начинать с выяснения принципиальной стороны проблемы: имеется ли внешняя зона, с площади которой вся находящаяся на ней рыба уходит из процеживаемого объема, т.е. имеет ли место неравенство $h_1 > 0$. Затем следует выяснить, существует ли внутреннее кольцо, с которого вся рыба улавливается тралом. Если $h_0 < R$, то это кольцо существует.

Из рис.2, на котором изображена зависимость φ от R для двух конкретных случаев, видно, что уловистость трала при увеличении его размеров вначале быстро возрастает. В дальнейшем, по мере увеличения R , уловистость изменяется мало и улов трала возрастает примерно пропорционально площади устья. На рис.3 показан характер изменения улова в зависимости от размеров трала (верхняя линия - изменение площади устья).

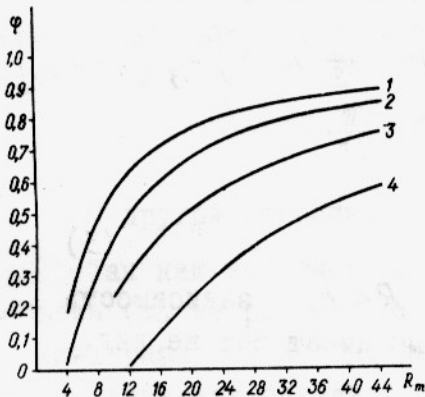


Рис.2. График зависимости уловистости трала от размера его устья:

- 1- $h_1 = 1\text{м}$, $h_2 = 3\text{м}$;
- 2- $h_1 = 3\text{м}$, $h_2 = 1\text{м}$;
- 3- $h_1 = 1\text{м}$, $h_2 = 10\text{м}$;
- 4- $h_1 = 10\text{м}$, $h_2 = 1\text{м}$

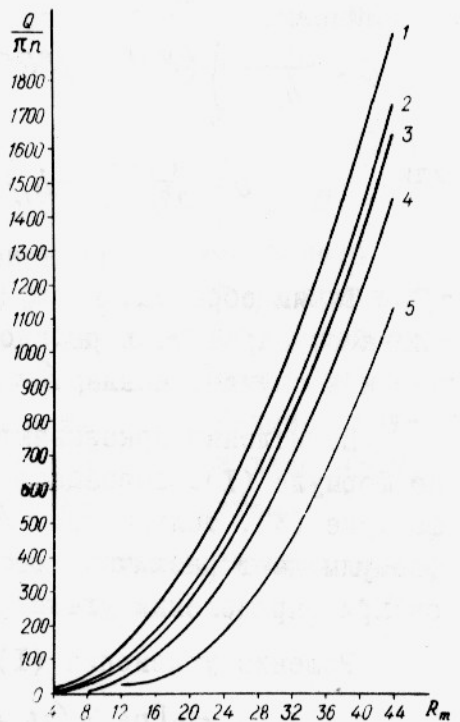


Рис.3. График зависимости улова от размеров устья трала:

- 1- $\frac{3}{\pi} = R^2$; 2- $h_1 = 1\text{м}$; $h_2 = 3\text{м}$; 3- $h_1 = 3\text{м}$, $h_2 = 1\text{м}$;
- 4- $h_1 = 1\text{м}$, $h_2 = 10\text{м}$; 5- $h_1 = 10\text{м}$, $h_2 = 1\text{м}$

Как видно из рис.3, при больших размерах трала кривые улова идут примерно параллельно друг другу и кривой изменения площади устья.

Теория лова тралом, имеющим прямоугольное устье

Предлагаемая модель пригодна не только для тралов, имеющих устье в виде кругового кольца. Предположим, например, что сечение устья вертикальной плоскостью, перпендикулярной к линии движения трала, имеет форму прямоугольника со сторонами L и H (рис.4). Пусть рыба, находящаяся в полосе шириной h_1 , от подбора и боковых кромок, уходит из процеживаемого объема воды полностью, а из следующей полосы шириной h_2 - частично. Улов такого трала при продвижении вперед на 1 м можно определить следующим путем.

Улов с внутреннего прямоугольника равен

$$q_1 = n(L - 2h_0)(H - 2h_0) = n[LH - 2h_0(H + L) + 4h_0^2].$$

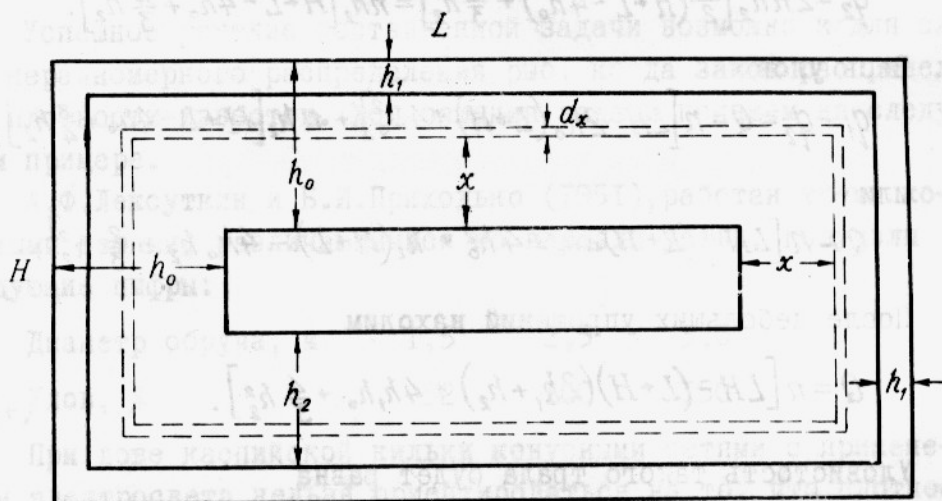


Рис.4. Расчетная схема к теории лова тралами, имеющими прямоугольное устье

Для определения улова с внутренней полосы вырежем полосу шириной dx , отстоящую от внутреннего прямоугольника на расстояние x . Ее площадь с точностью до бесконечно малых второго порядка равна

$$ds = 2[H + L - 4h_0 + 4x]dx.$$

Плотность распределения пойманных рыб n_i на площади этой полосы можно найти из пропорции

$$\frac{n}{h_2} = \frac{n_i}{h_2 - x}$$

Следовательно,

$$n_i = n \left(1 - \frac{x}{h_2}\right).$$

Улов с площади рассматриваемой полосы равен произведению $n_i ds$, т.е.

$$dq_2 = 2n(H+L-4h_0+4x)\left(1-\frac{x}{h_2}\right) dx.$$

Очевидно, весь улов равен

$$Q_2 = \int_0^{h_2} 2n(H+L-4h_0+4x)\left(1-\frac{x}{h_2}\right) dx,$$

или

$$Q_2 = 2n \int_0^{h_2} (H+L-4h_0) dx - 2n \int_0^{h_2} x \left(4 - \frac{H+L-4h_0}{h_2}\right) dx - 2n \int_0^{h_2} \frac{4}{h_2} x^2 dx.$$

После интегрирования и упрощения получим

$$Q_2 = 2nh_2 \left[\frac{1}{2}(H+L-4h_0) + \frac{2}{3}h_2 \right] = nh_2 \left[H+L-4h_0 + \frac{4}{3}h_2 \right].$$

Весь улов

$$q_1 + q_2 = Q = n \left[LH - 2h_0(L+H) + 4h_0^2 \right] + nh_2 \left[H+L-4h_0 + \frac{4}{3}h_2 \right],$$

или

$$Q = n \left[LH - (L+H)2h_0 + 4h_0^2 + h_2(H+L) - 4h_0h_2 + \frac{4}{3}h_2^2 \right].$$

После небольших упрощений находим

$$Q = n \left[LH - (L+H)(2h_1+h_2) + 4h_1h_0 + \frac{4}{3}h_2^2 \right]. \quad (4)$$

Уловистость такого трала будет равна

$$\varphi = 1 - \frac{(L+H)(2h_1+h_2) + 4h_1h_0}{LH} + \frac{4h_2^3}{3LH}. \quad (5)$$

Сравнивая формулы (1) и (4), а также (2) и (5), можно убедиться в том, что характер зависимостей Q и φ от размеров устья трала остался таким же, как и в первом случае.

Следуя изложенному методу, можно рассмотреть случай, когда вдоль одной из сторон ширина полос h_1 и h_2 будет иной, чем вдоль трех других сторон (такая ситуация имеет место при лове рыбы донными тралами). Для этого случая вычисления окажутся лишь более громоздкими, но принципиальная возможность решений и методы их нахождения не изменятся.

Сопротивление трала движению в воде пропорционально примерно площади его устья. Поэтому интересно сравнить уловы и уловистость тралов, равных по площади устья, но разных по его форме. Решение этой задачи в общем виде очень громоздко. Конкретные вычисления показывают, что уловы тралов с круговым сечением устья значительно больше, чем с прямоугольным и даже квадратным. Следовательно, тралы с круговым сечением обладают и большей уловистостью. Этот вывод имеет большое практическое значение, так как показывает путь повышения уловистости тралов.

Естественно, этот вывод справедлив только для случаев равномерного распределения рыбы (не только в горизонтальном, но в вертикальном направлениях), одинакового поведения рыбы во всех направлениях, одинаковой реакции рыбы на тралы различных размеров и т.д.

Теория лова тралом при переменной плотности рыбы

Успешное решение поставленной задачи возможно и для случаев неравномерного распределения рыб, когда закон распределения плотности известен. Ход решения задачи покажем на следующем примере.

А.Ф.Лексуткин и Б.И.Приходько (1951), работая тремя конусными сетями, различающимися по площади устья, получили следующие цифры:

Диаметр обруча, м	1,5	2,5	3,0
Улов, %	52	100	150

При лове каспийской кильки конусными сетями с применением электросвета нельзя ориентироваться на то, что плотность рыбы в скоплении постоянна. Действительно, при концентрировании каспийской кильки одиночным источником подводного света плотность скопления рыб, по данным подводных наблюдений, меняется, уменьшаясь с удалением от центра.

Методически не очень строгими опытами А.Ф.Лексуткин и Б.И.Приходько определили плотность скопления кильки на различных расстояниях от источника света. Обработывая их данные, В.В.Решетняк (1969) пришел к следующему закону распределения плотности:

$$n = n_0 e^{-0,5r}, \quad (6)$$

где n — плотность в точке, находящейся на расстоянии r от источника света,

n_0 — плотность у источника света.

При подъеме конусной сети она "вырезает" из сферы, которую образует косяк рыбы, цилиндр диаметром, равным диаметру обруча сети и высотой, равной глубине горизонта лова.

Введем обозначения по рис.5, считая, что источник света находится в начале координат. Тогда

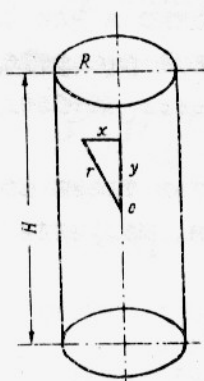
$$n = n_0 e^{-kr} = n_0 e^{-k\sqrt{x^2+y^2}}$$

Вследствии симметрии в качестве элементарного объема dv можно взять

$$dv = 2\pi x dx dy.$$

Количество рыбы в этом объеме

$$dQ = 2\pi n_0 x e^{-k\sqrt{x^2+y^2}} dx dy.$$



Следовательно, количество рыб в объеме цилиндра радиусом R и высотой H можно найти двойным интегрированием:

$$Q_0 = n_0 \int_0^H dy \int_0^R 2\pi x dx e^{-k\sqrt{x^2+y^2}}.$$

(7)

Рис.5. Расчетная схема к теории лова конусными сетями на электросвет

Этот интеграл можно взять только численно. Для вычислений на ЭВМ его полезно преобразовать. Положим, что

$$y = H\xi; \quad \frac{1}{k^2} Z = x^2 + y^2.$$

Отсюда

$$dy = H d\xi, \quad 2x dx = \frac{dz}{k^2}.$$

Подставляя эти значения в подинтегральное выражение, будем иметь

$$Q_0 = \frac{\pi n_0 H}{k^2} \int_0^1 d\xi \int_{y^2}^{(R^2+y^2)k^2} e^{-\sqrt{z}} dz$$

или

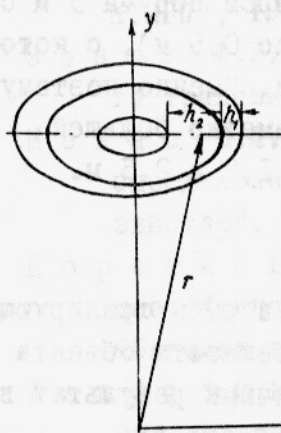
$$Q_0 = \frac{\pi n_0 H}{k^2} \int_0^1 d\varepsilon \int_{k^2 H^2 \varepsilon^2}^{k^2 (R^2 + H^2 \varepsilon^2)} e^{-\sqrt{z}} dz = \frac{\pi n_0 H}{k^2} J(kH, kR).$$

(7')

Таким образом, решение задачи об определении количества рыб, находящихся в объеме цилиндра радиусом R и высотой H , сводится к вычислению интеграла, зависящего от двух переменных величин и параметра k .

Если считать, что существуют три зоны, как это предполагалось ранее, улов с первой зоны (внутренней), с которой улавливается вся находящаяся в ней рыба, будет равен интегралу (7'), когда пределы интегрирования переменной x взяты от 0 до $R - h_0$. С учетом сделанных выше преобразований нижний предел будет равен $H^2 \varepsilon^2 k^2$ а верхний — $k^2 [(R - h_0)^2 + H^2 \varepsilon^2]$

Сложнее определить улов с зоны, с которой рыба уходит лишь частично. Интенсивность ухода рыбы определяется только переменной x . Рассуждая так же, как и в первом случае, можно найти следующую пропорцию (рис.6):



$$\frac{n}{h_2} = \frac{n_i}{R - h_1 - x}.$$

Отсюда

$$n_i = \frac{n}{h_2} (R - h_1 - x)$$

С учетом формулы (6)

$$n_i = \frac{n_0}{h_2} e^{-k\sqrt{x^2 + y^2}} \cdot (R - h_1 - x)$$

Рис.6. Схема к расчету плотности распределения рыб

Таким образом, улов с элементарного объема в пределах рассматриваемой области равен

$$dQ = n_i dv = \frac{n_0}{h_2} e^{-k\sqrt{x^2 + y^2}} \cdot (R - h_1 - x) dx dy.$$

Учитывая сделанные выше преобразования переменных, получим

$$Q_2 = \frac{\pi n_0 H}{h_2 k^2} \int_0^1 d\xi \int_{\frac{[(R-h_1)^2 + H^2 \xi^2] k^2}{k^2}}^{\frac{[(R-h_1)^2 + H^2 \xi^2] k^2}{k^2}} e^{-\sqrt{z}} \left(R - h_1 - \sqrt{\frac{z}{k^2} - H^2 \xi^2} \right) dz \quad (8)$$

Сумма интегралов (7') и (8) даст улов. При вычислении этих интегралов величину H следует брать кратной R . При увеличении H плотность рыбы убывает по закону (6). Поэтому плотность на оси ординат, когда $y=H$, равна $n=n_0 e^{-kH}$. В нашем случае, когда $H=1M$, $n:n_0=0,61$, а когда $H=4M$, $n:n_0=0,05$. Учитывая сравнительно небольшую точность, которой можно довольствоваться в такого рода расчетах, можно принять, что $H \leq (3-4)R$.

Вычисления интегралов (7') и (8) на ЭВМ "Минск 32" показали, что при сделанных предположениях величина h_1 близка к 0 ($h_1 \leq 0,1M$), а величина $h_2 \approx 1,25M$. Таким образом, при лове конусными сетями каспийской кильки на электросвет сетями с диаметром обруча 1,5 и 2,5 м внутренней области не существует и некоторая часть рыб уходит со всех точек облавливаемого пространства. При лове сетями с диаметром обруча 3 м существует небольшая внутренняя область (около 0,5 м), с которой улавливается вся находящаяся в ней рыба. Именно поэтому сети с таким диаметром обруча и обладают заметно большей уловистостью, чем сети с диаметром обручей 1,5 и 2,5 м.

З а к л ю ч е н и е

Предложенная математическая модель лова рыбы тралирующими орудиями опирается на биологические особенности объекта лова, при этом в расчет принимаются лишь конечный результат взаимодействия рыбы и орудия.

Для получения конкретных характеристик объекта лова (плотность распределения, величины h_1 и h_2), величин улова и уловистости трала достаточно экспериментальных данных по уловам трех тралов с различными размерами устья, но однотипных по своей конструкции.

Анализ показывает, что при равномерном распределении рыбы и одинаковом ее поведении во всех направлениях тралы с круговым сечением устья обладают заметно большей уловистостью, чем с устьем прямоугольной формы.

Предлагаемая модель не учитывает влияния конструктивных элементов трала на его уловистость (на поведение рыбы при встрече с тралом). Они могут быть учтены введением в полученные формулы экспериментальных коэффициентов. Поэтому выполненный анализ следует рассматривать лишь как первое приближение, лишь в общих чертах описывающий процесс лова рыбы тралами. Он, конечно, нуждается в дальнейшем совершенствовании и корректировке.

Л и т е р а т у р а

- Б а р а н о в Ф.И. Техника промышленного рыболовства. Калининград, КОИЗ. 1933, 472 с.
- Б а р а н о в Ф.И. Избранные Труды, т. I, 1969, М., "Пищевая промышленность", 716 с.
- Б а р а н о в Ф.И. Избранные Труды, т. III, М., "Пищевая промышленность", 1971, 300 с.
- Г ю л ь б а д а м о в С.Б. Промыслово-биологические основы проектирования пелагических тралов. "Труды ВНИРО", 1958, т. XXXVI, с. 192-235.
- Д у б р о в с к и й А.Д. Об уловистости трала. - "Труды КТИРП", 1964, вып. ХУП, 166-183 с.
- З о н о в А.И. Оптимальная продолжительность времени одного траления. - "Известия ГосНИОРХ", 1964, т. У I, с. 211-219.
- И о н а с В.А. Применение метода анализа размерностей при определении абсолютной уловистости трала. "Рыбное хозяйство", № 2, 1966, 46-48 с.
- К о р о т к о в В.К., К у з ь м и н а А.С. Трал, поведение объекта лова и подводные наблюдения за ним. М., "Пищевая промышленность", 1972, 267 с.
- Л е к с у т к и т. А.Ф., П р и х о д ь к о Б.И. Поведение кильки в освещенной зоне при лове на электросвет. "Рыбное хозяйство", 1951, № 12, с. 11-13.
- Н и к о н о р о в И.В. Непрерывные способы лова рыбы. М., "Пищевая промышленность", 1968, 103 с.
- Р е ш е т н я к В.В. О затенении света рыбой и сетным полетном при лове на свет, "Рыбное хозяйство", 1969, № 9, 44-45 с.
- С е р г е е в Ю.С. Теоретические основы промысловой работы и испытаний тралов. М., "Пищевая промышленность", 1969, 50 с.

Фридман А.Л., Лукашев В.Н., Розенштейн М.М. Проектирование и испытание тралов. М., "Пищевая промышленность", 1973, 260 с.
Честной В.Н. Об оптимальных скоростях траления.
- "Рыбное хозяйство", 1961, № 7, с.43-49.

To the theory of trawling

N.N.Andreev

S u m m a r y

As is known the catchability of trawls is noticeably less than 1. A method of determination of catchability on the basis of summarized biological features of the species fished is suggested, which is similar to the theory of purse seine fishing worked out earlier. Obtained by simple reasoning the final formulae include three unknown quantities. So it is agreeable if catches would be taken with three trawls with different dimensions of the mounths.

The analysis of the formulae indicates that at even distribution of fish and similar behavioural patterns the catchability of trawls with round sections of mouths is much higher than that of trawls with rectangular sections.

The calculation suggested is applicable not only to cases with even distribution of fish in the area, but also to other cases when the low of density variation is known. The model does not take into account effects of designed elements of trawls on the behavioural pattern when fish are encountered with the trawl, thus the analysis is to be considered as a first approximation describing the catching process only in general terms.